

# ORGANI DI TRASMISSIONE

comandi  
e azionamento

Trasmissioni meccaniche  
per generatori eolici

  
tecniche nuove

6 giugno 2013



**Gear Forum 2013**  
Gli ingranaggi  
e le trasmissioni del futuro

**Ricerca**  
Modello affidabilistico  
di un moltiplicatore eolico

**Ingranaggi non circolari**  
Funzionamento, lavorazione  
e sviluppo delle prestazioni

## Cuscinetti leggeri per applicazioni Dinamiche

Cuscinetti  
Guide lineari



Applicazioni

YouTube



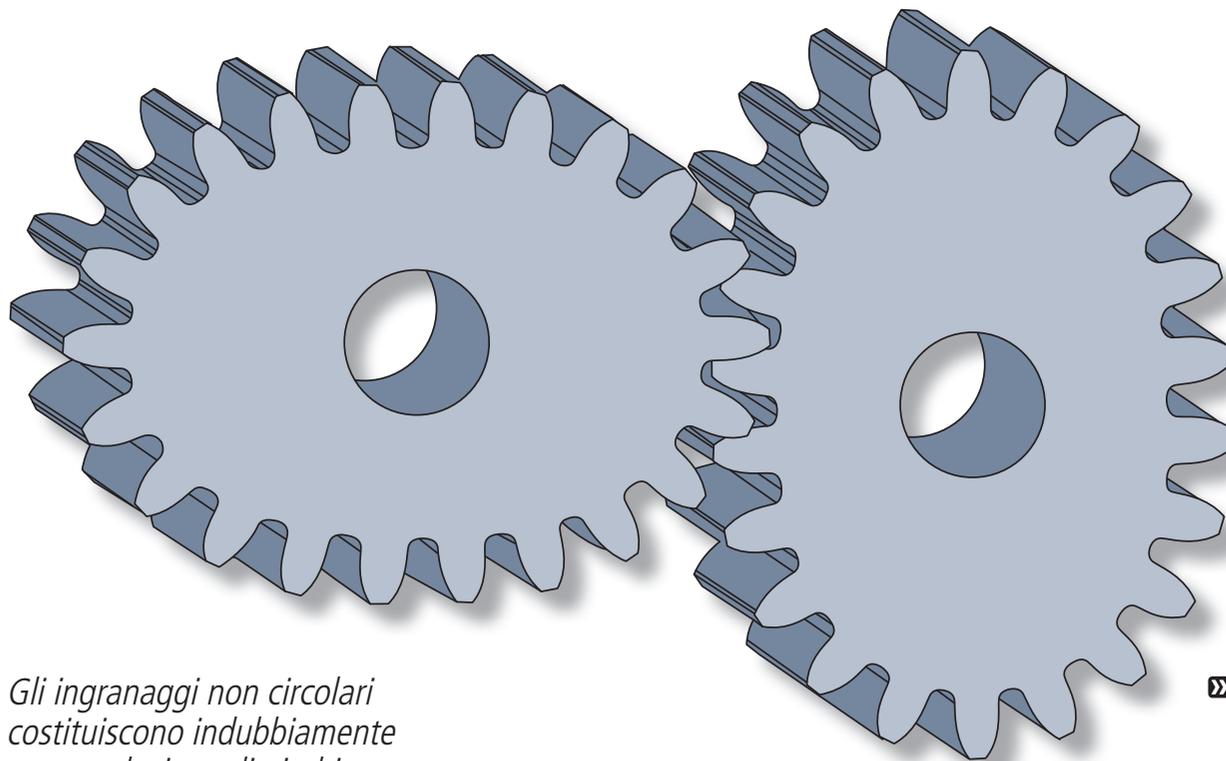
[www.franke-gmbh.it](http://www.franke-gmbh.it)

**HTC**

[info@htcfranke.it](mailto:info@htcfranke.it)

[www.htcfranke.it](http://www.htcfranke.it)

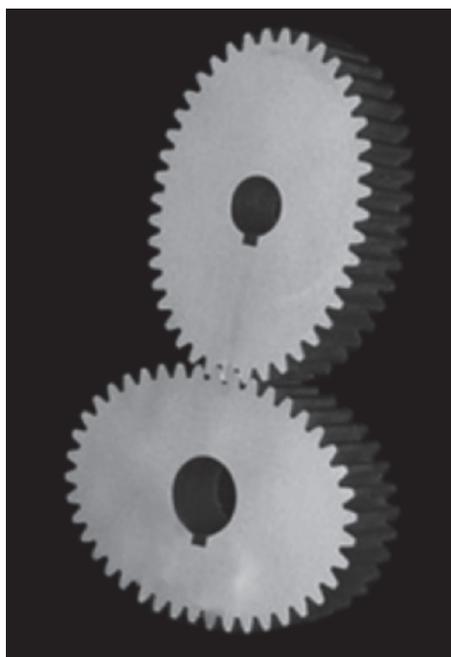
# Ingranaggi non circolari



✎ Gianfranco Bianco

*Gli ingranaggi non circolari costituiscono indubbiamente una produzione di nicchia, ma ci sono innumerevoli applicazioni che rendono questo tipo di ingranaggio interessante. La lavorazione è un aspetto che riveste un'importanza fondamentale.*

Una coppia di ingranaggi circolari, cioè quelli soliti che vengono impiegati in quasi tutte le trasmissioni, ha la funzione di massimizzare l'energia trasmessa con un rapporto costante, che dipende dal rapporto tra il numero di denti della ruota conduttrice e quella condotta. In un accoppiamento di ingranaggi non circolari il rapporto di trasmissione varia continuamente perché varia il rapporto tra i diametri istantanei di rotolamento. La velocità angolare della ruota condotta varia in modo ciclico



**Fig. 1 - Coppia di ingranaggi ellittici a due lobi.**

ed è appunto questa funzione che viene sfruttata, cioè quella di muovere dei meccanismi con velocità che seguono determinate leggi.

Questo è fattibile se i centri di rotazione delle due ruote accoppiate sono fissi.

Un'altra funzione degli ingranaggi non circolari, individuati anche con la sigla NCG (*Non Circular Gears*), può essere quella di variare l'interasse tra le ruote, cioè funzionare come una specie di camme. Si pensi per esempio a un ingranaggio circolare accoppiato a un ingranaggio ellittico il cui asse di rotazione possa spostarsi radialmente (punto 5 della tabella 1).

Gli impieghi possono essere i più svariati, e includono le macchine automatiche, dove è utile avere dei movimenti che iniziano in modo veloce per poi rallentare finendo la corsa in modo dolce ed evitare vibrazioni. Sono usati nelle macchine tessili, nelle macchine da stampa, nelle etichet-

tatrici e in molti altri dispositivi. In altri casi lo stesso scopo può essere ottenuto anche con pulegge dentate ellittiche, soprattutto utili in quei casi in cui i due assi di rotazione sono distanti l'uno dall'altro. La legge con cui la velocità angolare della ruota condotta varia dipende dalla forma

dei due ingranaggi e può essere calcolata matematicamente con algoritmi che a volte assumono una grande complessità. Questi calcoli matematici non verranno qui trattati e rimandiamo gli interessati ad approfondire questo aspetto in trattazioni specializzate.

## I vantaggi e limitazioni degli ingranaggi circolari

Per dare un'idea di cosa si possa fare con gli ingranaggi non circolari, si riportano in tabella 1 alcuni esempi di sagome di ingranaggi e delle variazioni di velocità della ruota condotta. Nell'accoppiamento (1) gli ingranaggi ellittici hanno l'asse coincidente con un fuoco dell'ellisse e quindi si ha solo un massimo a  $0^\circ$  e un solo minimo in corrispondenza di  $180^\circ$  di rotazione. Nell'accoppiamento (2) gli ingranaggi ellittici hanno il centro di rotazione coincidente con i centri delle ellissi. Si hanno in questo caso due minimi del rapporto di trasmissione in corrispondenza di  $90^\circ$  e  $270^\circ$  e due massimi a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

Nell'accoppiamento (3) la variazione di velocità della condotta è più frequente, con 4 massimi e 4 minimi, mentre nell'accoppiamento (4) si hanno 3 massimi e 3 minimi. Le sagome degli ingranaggi possono essere le più svariate in relazione alle leggi di movimento che si vogliono avere in uscita dal meccanismo.

In tutti i casi, rappresentati in tabella 1, l'ingranaggio conduttore e quello condotto sono uguali, e questo è evidentemente sufficiente (anche se non necessario) se si vuole mantenere l'interasse costante.

C'è tuttavia la possibilità che una delle due ruote abbia un numero di denti multiplo dell'altra con sagome che si ripetono in modo uguale per un numero intero di volte su un ingranaggio rispetto l'altro.

È altresì evidente che nei due ingranaggi deve essere individuato chiaramente il dente iniziale, ciò per poter fasare correttamente i due ingranaggi.

In ogni caso se le due sagome sono completamente diverse devono comunque avere una uguale lunghezza dello sviluppo, in altre parole il numero di denti di una ruota deve essere uguale o multiplo dell'altra.

Tutto ciò è valido se i due assi sono fissi, se invece l'asse della ruota condotta può spostarsi radialmente, si ha il caso indicato nel punto (5) della tabella.

In questo caso la conduttrice è circolare mentre la condotta può avere un numero di denti qualsiasi e una qualsiasi sagoma.

Denominazione degli ingranaggi	Grafico dell'accoppiamento (A sinistra ruota conduttrice)	Legge del moto della condotta ( $K =$ rapporto di trasmissione Ascisse = gradi di rotazione)
(1) Ellittici ad un lobo		
(2) Ellittici a due lobi		
(3) Quadrati		
(4) Triangolari		
(5) Funzione camme		

Tab. 1 - Sagome di ingranaggi e variazioni di velocità della ruota condotta.

Si ha in questo caso la funzione di camme, fornita dalla ruota condotta, il cui spostamento è tanto maggiore quanto più la sua sagoma si scosta dalla forma circolare.

Gli accoppiamenti con ingranaggi non circolari in molte situazioni sostituiscono in modo più economico altri dispositivi in grado di variare le velocità, come per esempio motori elettrici gestiti da un CNC o da un PLC. Questi ultimi, sono più costosi e più difficili da maneggiare dagli operatori e il più delle volte sono più ingombranti.

In generale i sistemi attualmente in uso hanno alcune importanti limitazioni che si possono così riassumere:

- **Sistemi di collegamento meccanici**

Poche possibilità di scegliere le leggi di moto finali

In genere i collegamenti hanno un'architettura complessa

Si occupa molto spazio

- **Meccanismi a cammes**

Si ottiene un differente tipo di movimento (per esempio, intermittente)

Il meccanismo si basa sulla forza di contatto

- **Sistemi servo-motor**

La precisione è influenzata dalle prestazioni dinamiche

Non viene garantito un movimento sicuro in caso sforzi anomali

Questi sistemi hanno maggiore flessibilità ma sono molto più costosi.

Di contro un sistema che usa gli ingranaggi non circolari presenta i vantaggi che sono riepilogati nella tabella 2.

## Un progetto europeo volto a migliorare le prestazioni

Un gruppo di aziende, non solo italiane, sta portando avanti un progetto per migliorare i metodi di progettazione e di esecuzione di questi ruotismi in modo che possano avere una più larga diffusione negli impieghi industriali e anche in dispositivi che vengono usati ogni giorno da milioni di persone. In questo progetto, denominato Vary-Gear, sono coinvolti:

Euren, a cui spetta la coordinazione delle attività (con sede a Bruino, Torino - Italia); ICAA, un partner che studia la messa a punto di speciali rivestimenti (Romania);

Caratteristica	Motivazione
Semplicità	Si usa solo una coppia di ingranaggi
Compattezza	
Prezzo	Si possono costruire grandi lotti senza problemi
Trasmissione di forti coppie nonostante la grande compattezza	Si tratta di un gruppo meccanico
Buona tolleranza dei sovraccarichi	
Lunga durata	
Affidabilità	
Garanzia di precisione	Collegamento cinematico

Tab. 2 - Vantaggi dell'impiego di ingranaggi non circolari.

Feanor, principale fornitore (Estonia); Stam, principale fornitore, (Genova - Italia); Università di Genova, che offre il Supporto tecnico e scientifico) (Genova -Italia). Alcuni dettagli sulle due aziende italiane coinvolte nel progetto.

### Euren Srl

Euren, localizzata a Bruino (Torino), è specializzata nella costruzione di ingranaggi sia cilindrici che conici, fino a diametri di 1.200 mm, con quantità che vanno dal singolo pezzo e preparazioni di prototipi alla piccola serie. Una parte della produzione è costituita da ingranaggi speciali, come per esempio face gear, cremagliere rettificata di precisione, settori dentati rettificati, ingranaggi sferici e gruppi di vite e corona a passo variabile. Altra importante produzione è quella riferita a ingranaggi e componenti vari per l'aeronautica, mercato in cui Euren si colloca come partner delle principali aziende nazionali e internazionali e in cui ha ottenuto omologazioni anche per realizzazioni di parti ad alta criticità.

Si tratta di un'azienda dinamica che investe molto nell'adeguamento dei mezzi di produzione con il duplice scopo di mantenere alti livelli di qualità che soddisfino i clienti più esigenti e quello di ridurre i tempi di produzione.

Nello stabilimento sono entrate recentemente macchine di ultima generazione, come per esempio, la rettificata di forma Niles ZP12 ad asse verticale che lavora ingranaggi cilindrici sia con dentatura esterna che con dentatura interna, fino a 1.200 mm di

diametro con elevata precisione e software ottimizzati per le più svariate applicazioni industriali.

Tutto il processo legato alla filiera aeronautica obbliga ad avere una scrupolosa gestione di ogni attività interna con una organizzazione che permetta di risalire, per ogni particolare prodotto, ai mezzi usati (macchine, utensili, apparecchi di controllo, personale ecc) in modo da avere una tracciabilità completa del percorso che ogni singolo pezzo ha fatto nelle linee di produzione.

Naturalmente anche gli apparecchi di controllo sono all'altezza della situazione e comprendono apparecchi di misura a tre assi, evolventimetri di ultima generazione che sono in grado di testare ogni pezzo prodotto per verificare l'osservanza delle varie specifiche internazionali quali DIN, UNI, EN, ISO, AGMA, BS e JIS.

All'interno sono disponibili anche apparecchiature che consentono l'analisi chimica e strutturale degli acciai impiegati per certificarne la conformità rispetto a quanto richiesto.

Attualmente, come si è già detto, è capofila del progetto per sviluppare in modo organico la progettazione e la costruzione di ingranaggi non circolari, in modo da diversificare ulteriormente l'offerta di prodotti speciali al mercato.

### Stam Srl

L'altra azienda fortemente impegnata in questo progetto è la Stam Srl, una PMI nata nel 1997 e con sede operativa a Genova. La società è specializzata nella progettazio-

ne e produzione di sistemi avanzati di trasmissione meccanica, automazione e robotica. Fornisce inoltre servizi di consulenza nel campo della ingegneria e progettazione meccanica.

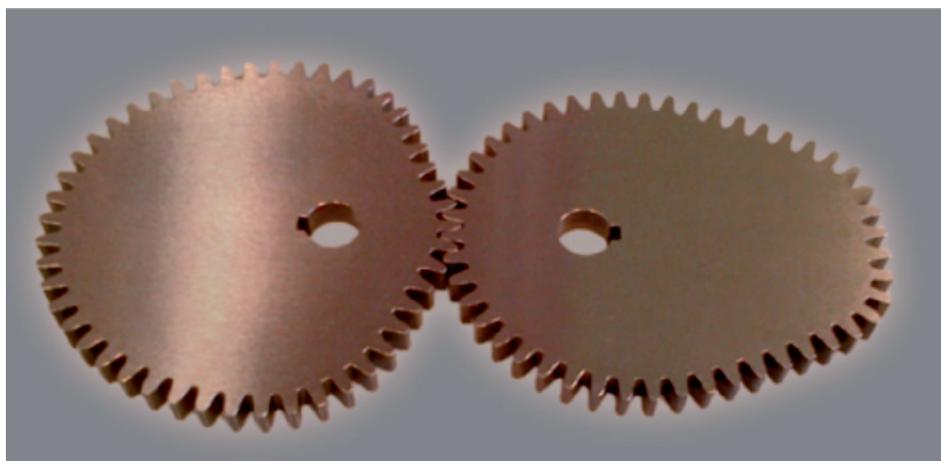
I settori principali in cui Stam opera sono: automazione/robotica, tessile, aeronautica e spazio. La società è inoltre fortemente orientata a rinnovare i suoi prodotti e il suo know how. Poiché gran parte del business di STAM è connesso al settore della trasmissione del moto, l'azienda ha recentemente realizzato un banco prova per la valutazione delle principali caratteristiche meccaniche dei riduttori che essa sviluppa, ed è attualmente impegnata nelle relative attività di test.

La forza dell'azienda risiede nella vasta esperienza acquisita dal suo personale nello sviluppo di soluzioni innovative per applicazioni industriali. Lo staff di STAM è infatti esperto in: modellazione geometrica di parti e assemblati, ottimizzazione dimensionale, progettazione meccanica integrata tramite sistemi CAD 3D, tecniche di analisi e simulazione computazionale (metodo degli elementi finiti, fluidodinamica, analisi termica, multibody, multiphysics).

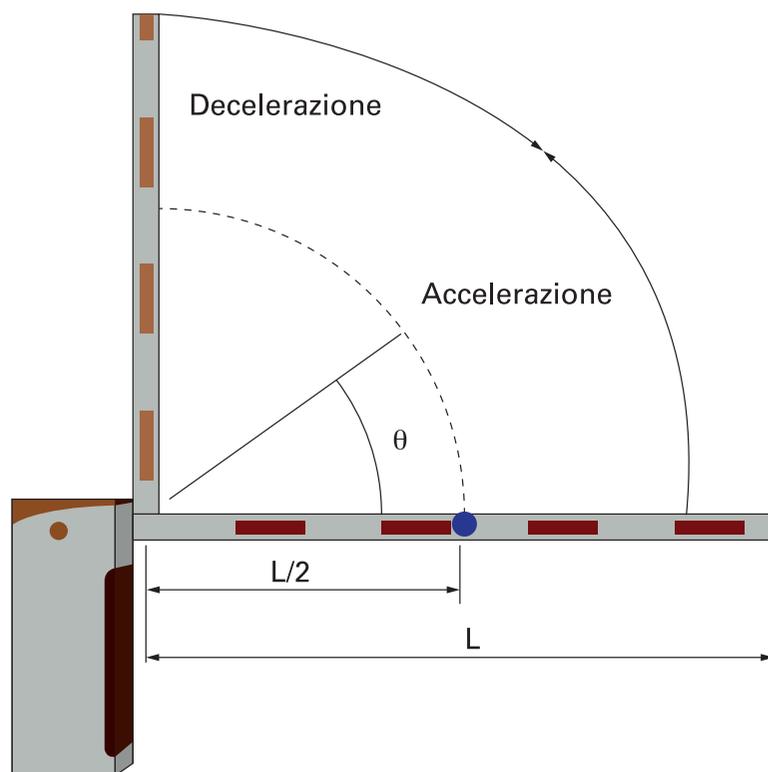
L'azienda è in grado di supportare le attività di progettazione, sviluppo, ingegnerizzazione, prototipazione e produzione di un prodotto, seguendone l'intero ciclo di messa a punto.

Stam ha una significativa esperienza di partecipazione a progetti di ricerca e sviluppo industriale. Essa ha iniziato a partecipare con grande successo ai progetti di ricerca in ambito europeo già dal V Programma Quadro e a oggi ha preso parte a più di 20 progetti con sede in differenti paesi dell'Unione Europea.

Stam divide equamente il suo fatturato tra Italia e Europa; i suoi principali clienti sono PMI italiane ed europee a cui vengono venduti servizi di consulenza o supporto alla progettazione. Stam è inoltre molto attiva nel settore spaziale, soprattutto nell'ambito del programma di trasferimento tecnologico (Technology Transfer Programme), di cui è uno dei principali attori in Italia; l'Agenzia Spaziale Europea è il maggiore cliente di questi contratti. Quanto sopra solo per



**Fig. 2 - Coppia di ingranaggi non circolari, progettata per il sollevamento di barriere mobili.**



**Fig. 3 - Schematizzazione di una barriera mobile che può essere comandata convenientemente da una coppia di ingranaggi non circolari.**

dare un'idea del livello tecnologico e scientifico in cui la Stam opera e per far capire meglio con quale serietà sia stato affrontato il problema della progettazione e realizzazione degli ingranaggi non circolari. Ritornando a questo argomento, bisogna precisare che la determinazione della sagoma della

coppia di ingranaggi, partendo dalla legge di moto che si vuole ottenere all'uscita del dispositivo richiede un software alquanto elaborato, ma questo è solo un aspetto del problema. Dispositivi del genere sono già esistenti, ma non sono del tutto adeguati allo scopo che si prefiggono.

### Gli obiettivi del consorzio

Il consorzio del progetto, coordinato dalla Euren, ha come obiettivo di realizzare una trasmissione meccanica innovativa ad alto rendimento e grande affidabilità lavorando nelle seguenti linee di ricerca:

richiesta una legge di moto varia nei  $360^\circ$ . La legge di moto adatta a questo dispositivo deve tener conto che la barra parte da ferma e deve fermarsi dolcemente e quindi devono essere previste una rampa di accelerazione e una di decelerazione. Inoltre la coppia ne-

le all'altro, a meno che la sagoma della linea primitiva non abbia dei larghi settori formati da porzioni di circonferenza.

Le due ruote hanno dentature coniugate ed hanno un uguale numero di denti esse devono pertanto essere fasate, quindi è necessario marcare il dente di partenza.

La progettazione è completata dalla verifica con una simulazione in 3D, che ha lo scopo di calcolare eventuali problemi di interferenza durante il funzionamento. Data la complessità di esecuzione e anche di calcolo, tutti gli ingranaggi di questo tipo sono a denti dritti.

A questo punto bisogna costruire gli ingranaggi e questo diventa un bel problema, perché i mezzi standard per eseguire dentature sono inadeguati o per la scarsa precisione o per l'enorme tempo che richiedono.

Creatori, coltelli stozzatori, frese e rettificatrici sono tutti strumenti concepiti per costruire ruote dentate circolari con denti uguali tra loro, qui invece ogni dente ha sue proprie caratteristiche, ben definite dal punto di vista matematico.

La Euren ha utilizzato il metodo dell'elettroerosione con filo che genera dentature con un'ottima precisione e con una buona finitura superficiale.

Il problema principale, che è stato risolto brillantemente dalla Euren, è il trasferimento dei parametri che definiscono i denti dal punto di vista matematico al controllo numerico che gestisce la traiettoria del filo della macchina per elettroerosione.

Come si è già accennato, è previsto di ricoprire le superfici con un film speciale, diverso da quelli che si usano negli utensili da taglio, che ha lo scopo di aumentare la vita della coppia dentata e di ridurre l'attrito.

Ottenuti i primi prototipi si tratta di verificare se si ottiene effettivamente la legge del moto voluta e da cui si era partiti.

Ciò è stato fatto utilizzando speciali banchi di prova (fig. 4), progettati e costruiti da Stam Srl. Questi banchi valutano l'efficienza dei prototipi o dei motori nelle differenti condizioni di carico e nelle differenti velocità in entrata, misurano la scorrevolezza della trasmissione meccanica e anche l'efficienza durante il servizio.

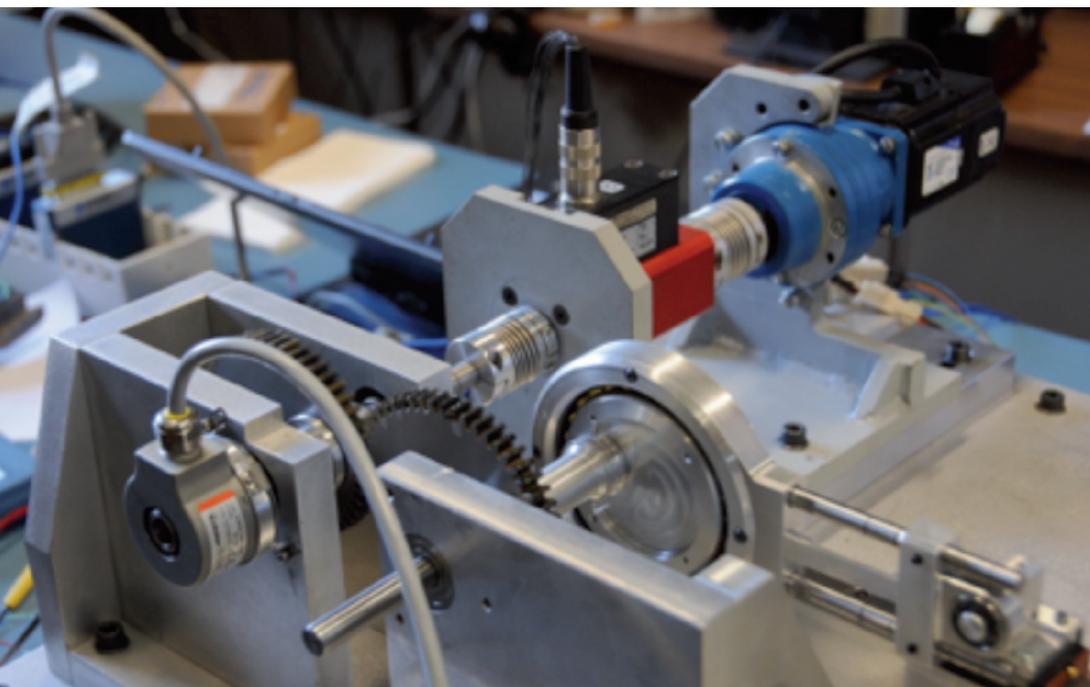


Fig. 4 - Banco di prova speciale per ingranaggi, realizzato da Stam Srl.

1. procedure innovative per la progettazione e il disegno di ingranaggi non circolari;
2. nuovi e più efficienti metodi di produzione degli ingranaggi non circolari;
3. studio di nuove tecniche di rivestimento adatte all'accoppiamento di ingranaggi non circolari, con lo scopo di minimizzarne l'usura;
4. studio di nuove tecniche di misurazione e controllo basate sullo sviluppo di soluzioni hardware e software specifiche per gli ingranaggi non circolari.

I risultati ottenuti verranno applicati nella realizzazione di prototipi di sistemi di movimentazione automatici di grande interesse industriale.

Il progetto ora è focalizzato nella progettazione, esecuzione e verifica dei risultati di un dispositivo per l'azionamento delle barriere mobili impiegate nei caselli autostradali, parcheggi ecc. (fig. 3) ma può essere applicato a qualsiasi dispositivo per il quale venga

richiesta una legge di moto varia da un massimo, a barra abbassata, fino a zero, con la barra alzata.

Stabilito l'andamento della velocità di movimento, un apposito software disegna la sagoma dei due ingranaggi. I profili così ottenuti costituiscono le linee primitive che diventano la base per la definizione della dentatura.

In funzione della massima coppia da trasmettere viene stabilita la «grandezza» dei denti, cioè quello che potrebbe essere definito, anche se impropriamente, il modulo della dentatura.

La lunghezza della linea primitiva viene poi suddivisa in tanti segmenti uguali quanti sono i denti dell'ingranaggio.

Ogni settore viene considerato come una porzione di un ipotetico cerchio primitivo e in base a questa approssimazione vengono calcolati i parametri di ogni singolo dente. È evidente che ogni dente avrà caratteristiche proprie e che non ce ne sarà uno ugua-



© RIPRODUZIONE RISERVATA